



بررسی رفتار خشک شدن کدو حلوایی به روش تابشی انکساری- هوای داغ

بیژن عسکری^۱، مهدی کاشانی نژاد^{۱*}، امان محمد ضیائی فر^۱، ابراهیم اسماعیل زاده^۲

۱- دانشکده صنایع غذایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۲- گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ های مقاله :

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۴

کلمات کلیدی:

جابجایی هوای داغ،

تابشی انکساری،

خشک شدن لایه نازک،

کدو حلوایی،

مدل سازی ریاضی.

DOI: 10.52547/fsct.18.09.25

* مسئول مکاتبات:

kashani@gau.ac.ir

در این تحقیق فرآیند خشک شدن لایه نازک کدو حلوایی با روش تابشی انکساری و هوای داغ بررسی و تاثیر دما و سینتیک خشک شدن کدو حلوایی و ارائه بهترین مدل ریاضی به منظور برازش تغییرات نسبت رطوبت به زمان تعیین گردید. در ابتدا برش های کدو حلوایی با ضخامت های ۳، ۵ و ۷ (میلی متر) تهیه شد. خشک شدن با دو روش تابشی انکساری با دماهای ۷۵، ۸۵ و ۹۵ (درجه سانتی گراد) و جابجایی با هوای داغ با دماهای ۵۵، ۶۵ و ۷۵ (درجه سانتی گراد) در سه تکرار انجام شد. در ارزیابی سینتیکی نمونه های خشک شده با مدل های هایلا و کلاک ضخامت نمونه و دمای خشک شدن بهینه تعیین شد (روش جابجایی هوای داغ، با ضخامت ۷ (میلی متر) و دمای ۵۵ (درجه سانتی گراد)؛ روش تابشی انکساری، با ضخامت ۷ (میلی متر) و دمای ۹۵ (درجه سانتی گراد). پنج مدل تجربی سینتیکی برازش داده با چهار معیار ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا، پیش بینی انحراف مربعات و نسبت ضریب تبیین به ریشه میانگین مربعات خطا تجزیه و تحلیل قرار گرفت. همچنین، قانون دوم فیک برای ارزیابی ضریب نفوذ موثر رطوبت و معادله آرنیوس در تعیین انرژی فعال سازی (E_a) استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدل هایلا و کلاک نسبت به سایر مدل ها به نحو مناسب تری مراحل خشک شدن لایه نازک کدو حلوایی را ارزیابی می نماید. مقدار انرژی فعال سازی ۳۷/۵۳۱۰۵۸۸ (کیلوژول بر مول) برای هوای داغ و ۲۰/۳۲۶۵۷ (کیلوژول بر مول) برای روش تابشی انکساری تعیین گردید. بهترین مدل ریاضی خشک شدن لایه نازک کدو حلوایی با روش تابشی انکساری و روش جابجایی با هوای داغ مدل هایلا و کلاک پیشنهاد شد.

۱- مقدمه

کدو حلوایی واریته (*Cucurbita moschata*) محصولی با میزان بالای ترکیبات فنلی، فلاونوئیدی، ویتامین ها، اسیدهای آمینه، پلی ساکاریدها، فیبرها و مواد معدنی می باشد [۱]. همچنین منبع سودمندی از بتا-کاروتن، فیبر رژیمی، ویتامین ها، مواد معدنی، حاوی کمی چربی بوده و دارای اثرات ضد دیابتی، آنتی اکسیدانی، ترکیبات ضد سرطانی و ضد تورمی می باشد [۲]. دانه کدو حلوایی دارای خاصیت ضد انگلی، دفع اوره از بدن [۳]، کاهش چربی [۴]، ضد سرطان [۵]، تقویت کننده سیستم عصبی (روغن دانه کدو حلوایی) [۶] و خواص ضد میکروبی (عصاره برگ کدو حلوایی) می باشد [۷]. همچنین برای افزایش میزان هموگلوبین خون و کاهش تب و تهوع استفاده می شود [۸ و ۹]. میزان تولید کدو حلوایی بر طبق آمار سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل در سال ۲۰۱۹، در ایران ۱۹۱۰۷۷ تن و در جهان در حد ۲۲۹۰۰۸۲۶ تن بوده است [۱۰]. خشک کردن مواد غذایی از متداول ترین فرایندها در افزایش ماندگاری ماده غذایی می باشد، به نحوی که به طور قابل ملاحظه ای فعالیت میکروارگانیسم ها را کاهش داده و منجر به کاهش تغییرات فیزیکوشیمیایی طی نگهداری می شود و ایجاد خصوصیات حسی تقریباً مشابه با محصولات تازه می گردد [۱۱]. روش خشک کردن جابجایی با هوای داغ، از مطلوب ترین روش ها جهت کاهش رطوبت میوه ها و سبزی ها می باشد [۱۲]. فناوری خشک شدن به روش تابشی انکساری، روش نوینی است که مواد غذایی مایع و سایر ترکیبات غذایی به صورت پودر، ورقه یا صفحات خشک شده با ارزش تغذیه ای مناسبی تبدیل می شوند. سازور کار این فناوری به این صورت می باشد که امواج مادون قرمز در محدوده دمایی ۹۵ تا ۹۷ (درجه سانتی گراد) از آب ساطع شده و توسط فیلتر ویژه و منحصر به فردی با عنوان لایه مایلار از جنس پلی اتیلن پلی استایرن عبور نموده و به ماده غذایی مرطوب می رسد. انواع انتقال به روش جابجایی و هدایت در سطح پایین فیلم مایلار، هدایت از طریق فیلم مایلار، انتقال حرارت به روش تابش از طریق آب گرم به فیلم مایلار و انتقال حرارت جابجایی در سطح بالای مواد غذایی انجام می گردد. حرارت مورد نیاز توسط فرآیند خشک کردن با استفاده از آب داغ سیرکوله شده در مخزن تامین

می شود. ماده غذایی به صورت لایه نازکی بر نوار نقاله پلاستیکی گسترده شده و به شکل پیوسته و با سرعت مورد نیاز خشک می گردد. در پژوهش نیندو و همکاران (۲۰۰۷) اشاره شده است که انواع پوره، آمیوه، آب سبزی، گیاهان دارویی، سوسپانسیون غذایی و برش ماده غذایی توسط سامانه خشک کن تابشی انکساری، خشک می گردد و این فرآیند در مدت زمان کوتاه معمولاً ۳ تا ۵ (دقیقه) انجام می شود و فرآورده نهایی با رنگ، ویتامین و ترکیبات آنتی اکسیدانی مطلوب تولید می گردد [۱۳]. در بررسی جعفری و همکاران (۲۰۱۵) بر روی خصوصیات کیفی کیوی خشک شده با هوای داغ و روش تابشی انکساری، مشخص شد که فرآورده خشک شده با روش تابشی انکساری پارامترهای کیفی مطلوب تری نسبت به روش جابجایی با هوای داغ دارد [۱۴]. نتایج بررسی بر روی پودر انبه روش های خشک شدن بر خصوصیات فیزیکی و ریز ساختارهای پودر انبه (*Philippine 'Carabao' var.*) نشان داد که خشک شدن به روش تابشی انکساری، پودری با کیفیت مناسب نسبت به روش انجمادی و غلطکی ایجاد می نماید [۱۵]. در بررسی کدو حلوایی خشک شده با سامانه تابشی - انکساری، اثرات جابجایی انتقال حرارت توسط جابجایی به روش طبیعی و اجباری با گردش هوا در بالای نمونه و اثرات انتقال حرارت به روش هدایت بر روی لایه مایلار و لایه مایلار با پوشش فویل آلومینیوم بررسی شد. بیشترین و کمترین درجه حرارت متوسط به ترتیب در روش جابجایی طبیعی با استفاده از صفحه مایلار - آلومینیوم و روش اجباری با استفاده از صفحه مایلار مشاهده شد. نتایج نشان داد که انتقال حرارت به روش جابجایی و هدایت معنی دار بوده و انتقال حرارت به دلیل اجزاء مختلف در سامانه دارای (آب، لایه نازک برای خشک کردن، فرآورده و هوا) بررسی و مشخص گردید که هزینه تجهیزات سامانه خشک کن تابشی - انکساری تقریباً یک سوم تا دو سوم کمتر از خشک کن انجمادی بوده و راندمان انرژی بالاتر و صرفه اقتصادی بیشتری نسبت به آن دارد [۱۶]. نتایج بررسی ویژگی های فیزیکوشیمیایی هویج توسط خشک کن تابشی انکساری نشان داد که از این فناوری می توان برای تولید فرآورده هایی با خصوصیات فراسودمندی مطلوب تر در مقایسه با روش خشک شدن توسط جابجایی با هوای داغ استفاده نمود [۱۷]. اطلاع از سینتیک خشک شدن و رطوبت تعادلی مواد

را با سایر روش های خشک کردن مواد غذایی متمایز می نماید. نتایج سایر پژوهش ها نیز این امر را تصدیق می نماید [۱۴ و ۱۷].

۲- مواد و روش ها

۲-۱- آماده سازی نمونه

در این مطالعه کدو حلوائی به صورت تازه از مزرعه ای در گرگان (با طول و عرض جغرافیایی ۳۶/۷۳۹۲ درجه شمالی و ۵۳/۹۰۸۳ درجه شرقی) تهیه و در کیسه های پلی اتیلنی به آزمایشگاه منتقل شد. در این مرحله کدو حلوائی واریته *Cucurbita moschata* (توسط بخش باغبانی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان شناسایی گردید. نمونه های یکسان از نظر رنگ و بر اساس غلظت مواد جامد محلول (بریکس) (به روش رفرکتومتری) انتخاب شد. به منظور کاهش شدت تنفس و تغییرات شیمیایی، تمامی نمونه ها در محل خنک و تاریک با دمای ۱۰ تا ۱۲ (درجه سانتی گراد) پیش از انجام آزمون نگهداری و آزمایش ها در دمای آزمایشگاه ۲۱ تا ۲۵ (درجه سانتی گراد) انجام شد. در مرحله بعد سطح کدو حلوائی شسته شده و توسط برش زن دستی به صورت برش نازک مدور با قطر ۲/۵۵ (سانتی متر) تبدیل گردید.

۲-۲- فیلم مایلار

این فیلم از شرکت دوپونت آمریکا تهیه شد و درصد عبور و جذب فیلم مایلار به ترتیب درحد ۸۱/۱۸۵ درصد و ۰/۰۹۱ در طول موج ۵۲۰ (نانومتر) توسط طیف سنج 7300 JENWAY ساخت کشور انگلستان تعیین گردید و برای فرآیند خشک کردن تابشی انکساری استفاده شد.

۲-۳- تعیین رطوبت

میزان رطوبت اولیه نمونه توسط روش آون گذاری با دمای ۱۰۰ تا ۱۰۵ درجه سانتی گراد به مدت ۵ ساعت با سه تکرار و میانگین ۸۹/۷۸ درصد بر مبنای مرطوب (۸/۷۸۵ درصد بر مبنای خشک) یا رطوبت نهایی ۱۷/۰۰۹۶۷ درصد بر مبنای مرطوب (۱۸/۰۴ درصد بر مبنای خشک) تعیین گردید [۲۲]. در این مطالعه ابتدا لایه ی نازک کدو حلوائی با ضخامت های ۳ و ۵ و

بیولوژیکی در شرایط فرآوری، اهمیت زیادی در طراحی خشک کن و مدل سازی فرآیندهای خشک شدن دارد [۱۸]. سینتیک خشک شدن تا حد زیادی تحت تاثیر دمای هوا و ابعاد ماده غذایی قرار می گیرد [۱۹]. ضریب نفوذ موثر رطوبت (D_{eff}) از پارامترهای مهم خشک شدن بوده و بیانگر تمامی سازوکارهای انتقال رطوبت می باشد. این پارامتر معمولاً از منحنی های تجربی خشک شدن تعیین می گردد. انرژی فعال سازی از پارامترهای مهم خشک شدن است که نمایانگر سطح انرژی مولکول های آب در انتشار رطوبت و تبخیر می باشد. ارتباط دما با ضریب نفوذ موثر را می توان توسط معادله آرنیوس نشان داد. بنابراین انرژی فعال سازی از شیب نمودار معادله آرنیوس $\ln(D_{eff})$ در برابر $1/T$ تعیین می گردد. معمولاً فرض عمده در تعیین تجربی ضریب نفوذ موثر رطوبت این است که در خشک کردن، انتقال جرم محدود می گردد. بنابراین دما باید طی فرآیند خشک کردن در کل نمونه به صورت همدا ثابت باشد. علاوه بر این دمای مورد استفاده در معادله آرنیوس برای تعیین انرژی فعال سازی با دمای محیط خشک کردن یکسان باشد [۲۰]. در فرآیند خشک شدن لایه نازک بر روی برش های پسته، سیب و کدو در یک خشک کن جابجایی هوای داغ، ۱۳ مدل سینتیکی مختلف شامل مدل های نیمه تئوری و یا تجربی، برای آنالیز داده های آزمایشی استفاده و مدل میدلی و کوشوک^۱ به عنوان بهترین مدل انتخاب گردید [۲۱]. هدف از این مطالعه، ارائه بهترین مدل نیمه تئوری و سینتیکی خشک شدن لایه نازک کدو حلوائی با روش های هوای داغ و روش نوین تابشی انکساری بود که با استفاده از مناسب ترین مدل، فرآیند و نحوه خشک شدن فرآورده توسط جابجایی با هوای داغ و روش تابشی انکساری پیش بینی و ضریب نفوذ موثر رطوبت و انرژی فعال سازی تعیین شد. همچنین مطابقت نتایج آزمایش با قانون دوم فیک و بررسی ارتباط داده های تجربی با مدل های مورد بررسی انجام شد. به طور کلی این روش نوین خشک کن تابشی انکساری نسبت به سایر روش های خشک کردن متفاوت بوده و استفاده از امواج مادون قرمز ساطع شده از آب داغ و عبور امواج مادون قرمز از یک فیلتر منحصر به فرد در خشک نمودن مواد غذایی در آن کاربرد دارد که این روش

در معادله های (۱) و (۲) M_0 ، X_{S0} ، M_t ، X_{wt} به ترتیب نشان دهنده وزن اولیه، درصد ماده جامد اولیه، وزن نمونه در زمان t ، درصد ماده جامد در زمان t و میزان رطوبت بر مبنای مرطوب می باشد. X_{db} با استفاده از معادله (۳) محاسبه شد.

$$X_{db} = X_{wt} / 1 - X_{wt} \quad (3)$$

در معادله (۳) X_{db} و X_{wt} به ترتیب نشان دهنده میزان رطوبت بر مبنای مرطوب و میزان رطوبت بر مبنای خشک می باشد [۲۳].

۲-۴- مدل سازی سینتیکی فرآیند خشک کردن،

تعیین ضرایب نفوذ موثر و انرژی فعال سازی

به منظور مدل سازی نسبت رطوبت کدو حلوایی در فرآیند خشک کردن کدو حلوایی از ۵ مدل شناخته شده استفاده شد (جدول ۱). مدل های رگرسیونی تغییرات نسبت رطوبت در طی خشک کردن بر اساس متغیر مستقل زمان توسط نرم افزار متلب ۲۰۱۷ برازش شد. از چهار معیار ضریب رگرسیون R^2 (معادله ۲)، ریشه میانگین مربعات خطای داده ها^۲ (معادله ۳)، کمترین مقدار مربع کای χ^2 (معادله ۴) و خطای انحراف میانگین^۴ (معادله ۵)، برای سنجش بهترین مدل استفاده شد که برای هر مدل هرچه مقدار R^2 بیشتر و مقادیر χ^2 و RMSE کمتر باشد، مدل بهتر است [۲۴].

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N ((MR_{pre,i} - MR_{exp,avg})^2)}{\sum_{i=1}^N ((MR_{exp,i} - MR_{exp,avg})^2)} \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - n} \quad (6)$$

در معادلات فوق، $MR_{exp,i}$ نسبت رطوبت کدو مشاهده شده در آیین اندازه گیری، $MR_{pre,i}$ نسبت رطوبت کدو حلوایی پیش بینی شده در آیین اندازه گیری، N تعداد مشاهدات (داده ها)، n تعداد ثابت های به کار رفته در معادله می باشد.

۷ (میلی متر)، در پلیت های شیشه ای قرار داده شد و سپس نمونه به آن جابجایی با هوای داغ (BINDER-FD) ساخت کشور آلمان منتقل گردید. پس از رسیدن آن به شرایط پایدار، نمونه ها در دماهای ۵۵، ۶۵ و ۷۵ (درجه سانتی گراد) خشک شد. به منظور خشک شدن نمونه ها از خشک کن تابشی انکساری استفاده گردید. این سامانه خشک کن ترکیبی مادون قرمز-تابشی انکساری غیرمداوم بوده و سینتیک خشک شدن کدو حلوایی با استفاده از آن بررسی گردید. بخش های اصلی سامانه عبارتند از: (۱) مخزن آب داغ (۲) لامپ مادون قرمز (۳) نمونه ماده غذایی (۴) محفظه خشک کن (۵) دریچه خروج هوا و بخارات (۶) لایه مایلار (۷) تنظیم کننده ولتاژ (شکل ۱). علاوه بر این نمونه های کدو حلوایی با استفاده از کولیس با دقت ۰/۰۲ (میلی متر) با ضخامت های ۳، ۵، ۷ (میلی متر) برش داده شد و دماهای ۷۵، ۸۵ و ۹۵ (درجه سانتی گراد) با سه تکرار جهت خشک نمونه ها اعمال گردید. نمونه ها ابتدا در فاصله های زمانی مشخص با استفاده از ترازوی دیجیتالی A&D EK-610i با دقت ۰/۰۱ (گرم) (ساخت کشور ژاپن) تا رسیدن به رطوبت تعادلی توزین گردید.

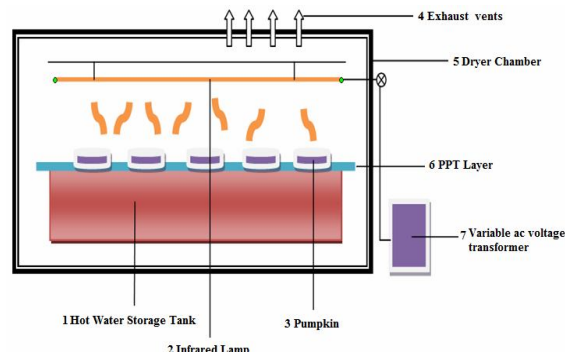


Fig 1 Schematic Diagram of Refractance Window Dryer

آزمون ها در سه تکرار انجام و میانگین مقادیر بدست آمده جهت مدل سازی مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه، با استفاده از قانون بقای جرم (معادله ۱)، میزان رطوبت نمونه ها بر مبنای مرطوب (معادله ۲) در طی روند خشک کردن محاسبه شد.

$$M_0 \times X_{S0} = M_t \times X_{st} \quad (1)$$

$$1 - X_{st} = X_{wt} \quad (2)$$

1. Regression coefficient (R^2)
2. Root Mean Square Error (RMSE)
3. Reduced chi-square (χ^2)
4. Mean Bias Error (MBE)

Table 1 Empirical models used to model data on drying

Model Name	Equation	References
Newton	$MR = \exp(-kt)$	Liu & Bakker-Arkema, 1997
Midilli-Kucuk	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$	Midilli et al., 2002
Hii, Law & Cloke	$MR = a \exp(-kt^n) + c \exp(-gt^n)$	Hii et al., 2009
Approximation of diffusion	$MR = a \exp(-kt) + (1-a) \exp(-k at)$	Yaldiz et al., 2001
Henderson and pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Beigi., 2016

که در آن m_t میزان رطوبت در زمان t ، m_0 رطوبت اولیه، m_e مقدار رطوبت تعادلی، L نصف ضخامت تیغه (برحسب متر)، D_{eff} ضریب نفوذ مؤثر رطوبت (برحسب متر مربع بر ثانیه)، t زمان (برحسب ثانیه)، MR نسبت رطوبت (بدون بُعد) و k_0 شیب خط می باشد. ضریب نفوذ معمولاً با رسم داده های تجربی خشک شدن برحسب MR نسبت به زمان تعیین می گردد. ضریب نفوذ مؤثر، همان شیب زاویه ی بخش خطی است.

۲-۶- محاسبه انرژی فعال سازی

معادله نفوذ مؤثر رطوبت با دما، با معادله آرنیوس بیان می شود.

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (11)$$

که در آن D_0 ضریب پیش نمایی معادله ی آرنیوس (m^2/s) ، E_a انرژی فعال سازی برای نفوذ رطوبت (کیلوژول بر مول)، R ثابت جهانی گازهای ایده آل (کیلوژول بر کیلومول درجه کلوین)، T دمای مطلق (درجه کلوین) می باشد. انرژی فعال سازی را می توان با ترسیم $\ln(D_{eff})$ برحسب عکس دمای کلوین تعیین نمود [۲۵].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر دما بر زمان خشک شدن کدو

حلوایی با روش هوای داغ

کاهش محتوای رطوبت کدو حلوایی، پس از توزین نمونه ها در فواصل زمانی مشخص ثبت گردید. فرآیند خشک شدن کدو حلوایی رطوبت اولیه از ۸۹/۷۸٪ تا رطوبت نهایی ۹٪ بر مبنای مرطوب در دماهای ۵۵، ۶۵ و ۷۵ (درجه سانتی گراد) با ضخامت های ۵، ۳ و ۷ (میلی متر) انجام شد (شکل ۲). نتایج نشان داد که دمای خشک شدن اثر قابل ملاحظه ای بر زمان فرآیند داشته و زمان لازم برای خشک شدن کدو حلوایی در ضخامت ۳ (میلی

۲-۵- تعیین ضریب نفوذ مؤثر رطوبت

قانون فیک^۱ اغلب برای توصیف پدیده نفوذ رطوبت به کار می رود.

$$\frac{\partial x}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 x}{\partial x^2} \quad (7)$$

که در آن X مقدار رطوبت موضعی در مبنای خشک، t زمان و x شاخص فضایی^۲ می باشد. معادله ی انتشار قانون دوم فیک^۳ بر نفوذ جرم در طی دوره ی سرعت نزولی خشک شدن محصولات کشاورزی دلالت دارد. برای به کار بردن قانون فیک فرض می گردد که فرآورده ی غذایی تک بعدی است، رطوبت اولیه یکنواختی دارد و دارای حرکت درونی رطوبت مانند مقاومت عمده در برابر انتقال رطوبت است. حل معادله ی فیک برای یک تیغه^۴ به صورت زیر می باشد.

$$\frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \left(\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)\right] =$$

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e}$$

ضریب نفوذ مؤثر از طریق محاسبه شیب معادله ی زیر بدست می آید.

$$MR = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (9)$$

زمانی نمودار مقدار MR نسبت به زمان رسم گردد، شیب خط بدست آمده را در معادله زیر قرار داده تا ضریب نفوذ مؤثر بدست آید.

$$k_0 = \left[\frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right] \quad (10)$$

1. Fick's Law
2. Spatial Coordinate
3. Fick's Law
4. Slab

محصول زیاد بوده و آهنگ کاهش رطوبت بالا می باشد. اما به تدریج با گذشت زمان و افت رطوبت کدو حلوایی، سرعت کاهش رطوبت نیز کاهش می یابد. با توجه به اینکه در مراحل اولیه فرآیند، محصول بیشتر رطوبت خود را از دست می دهد، زمان زیادی برای از دست دادن رطوبت باقی مانده لازم دارد. در ضخامت های ۳، ۵ و ۷ میلی متر با افزایش دما از ۵۵ تا ۷۵ درجه سانتی گراد کاهش زمان خشک شدن صورت می گیرد، نتایج بدست آمده، مشابه با نتایج سایر پژوهشگران می باشد [۲۰ و ۲۱].

متر) با دماهای ۵۵، ۶۵ و ۷۵ (درجه سانتی گراد) به ترتیب کاهش می یابد. زمان خشک شدن نمونه با ضخامت ۳ میلی متر و دمای ۷۵ درجه سانتی گراد به مدت ۶۰ دقیقه بود که این تیمار، در میان تیمارهای مورد بررسی، دارای بهترین زمان خشک شدن با روش جابجایی هوای داغ بود. نتایج مشابه توسط سایر پژوهشگران روی محصولات کشاورزی مختلف با این نتایج مطابقت دارد [۲۴، ۲۵]. در ضخامت های ۵ و ۷ (میلی متر) با افزایش دما از ۵۵ تا ۷۵ (درجه سانتی گراد)، افزایش آهنگ خشک شدن صورت می گیرد. در شروع فرآیند خشک شدن، رطوبت اولیه

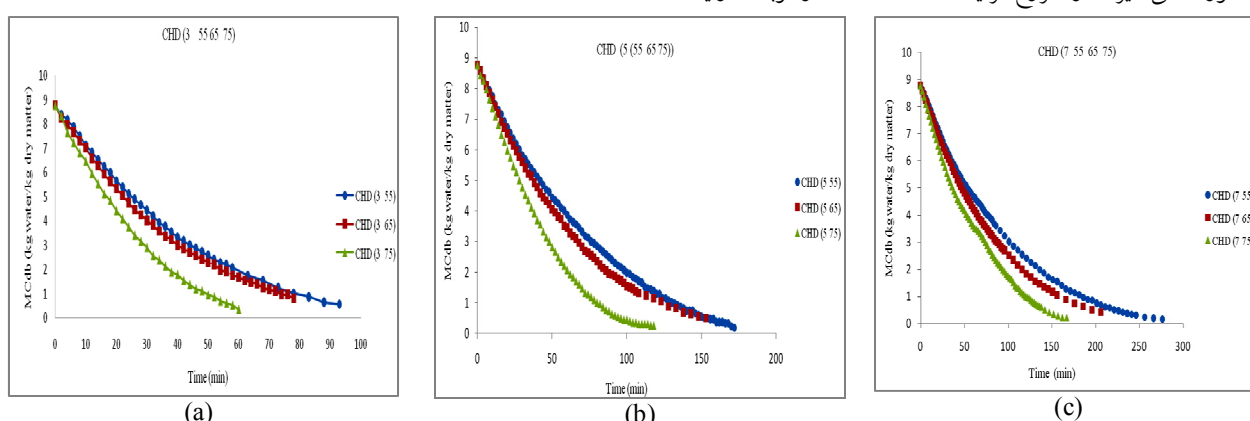


Fig 2 Effect of temperature on the drying kinetics of convective hot air drying (CHD) of pumpkin samples with 3, 5 and 7 mm thicknesses (a, b and c)

بدست آمد. علاوه بر این نسبت R^2/RMSE برای روش جابجایی با هوای داغ در دامنه ۴۹/۱۶۹۹۶۰۴۷ تا ۲۵۷/۹۴۶۳۳۶۴ و برای روش تابشی انکساری در دامنه ۷۸/۰۵۸۱۶۶۵۴ تا ۲۳۲/۱۳۳۷۳۵۸ حاصل شد. نتایج نشان داد که مدل هایلا و کلاک^۱ دارای بالاترین R^2 و کمترین RMSE می باشد. بنابراین بالا بودن مقدار ضریب تبیین و کم بودن مقدار ریشه میانگین مربعات خطا و بالا بودن نسبت ضریب تبیین به ریشه میانگین مربعات خطا مهمترین دلیل در انتخاب بهترین مدل مورد برازش می باشد. نتایج مشابه توسط سایر پژوهشگران مطابقت دارد [۲۶، ۲۷]. با توجه به شاخص های بدست آمده در جدول ۴، مشخص شد که مدل هایلا و کلاک در دماهای مورد بررسی نسبت به سایر مدل ها دارای برازش بهتری می باشد. بنابراین می توان این مدل را برای خشک شدن کدو حلوایی به روش جابجایی با هوای داغ توصیه نمود.

۳-۲- مدل سازی سینتیک خشک شدن لایه نازک

کدو حلوایی با روش های جابجایی هوای داغ و

تابشی انکساری

در این مطالعه، پنج مدل نیمه تئوری خشک شدن لایه نازک کدو حلوایی با ضخامت های ۳، ۵ و ۷ (میلی متر) در دامنه دمایی ۵۵ تا ۷۵ (درجه سانتیگراد) مورد برازش قرار گرفت. مقادیر ضرایب نفوذ موثر برای هر یک از این پارامترها در جدول ۲ ارائه شده است. مقدار ضریب تبیین برای مدل های سینتیکی تحت بررسی برای روش جابجایی با هوای داغ در دامنه ۰/۹۹۹۲ تا ۰/۹۹۹۸ و برای روش تابشی انکساری در دامنه ۰/۹۹۸۳ تا ۰/۹۹۹۸ گزارش شد، همچنین حداقل مقدار ریشه میانگین مربعات خطا و خطای انحراف میانگین برای اغلب مدل های سینتیکی برازش شده برای روش جابجایی با هوای داغ در دامنه ۰/۰۷۵۰۹ تا ۰/۱۲۷۹ و برای روش تابشی انکساری در دامنه ۰/۰۴۳۰۷ تا ۰/۰۲۰۲۴

1. Hii, Law & Cloke

Table 2 The effective diffusion coefficient values of CHD process

The effective diffusion coefficient (D_{eff} (m^2/s))			
75(°C)	65(°C)	55(°C)	Temperature (°C)
			Thickness (mm)
8.673910^{-10}	5.2588710^{-10}	3.92387×10^{-10}	3
1.72392×10^{-7}	1.19591×10^{-7}	9.80571×10^{-8}	5
1.34147×10^{-9}	9.98905×10^{-10}	9.52237×10^{-10}	7

Table 3 Activation energy values of the convective hot air drying

Activation Energy (kJ/mol)	Thickness (mm)
37.5310588	3
26.6862772	5
16.1407996	7

Table 4 The best treatments of convective hot air drying of pumpkin sample at 55 (°C) and 7 (mm) thickness

R^2/RMSE	RMSE	Radj	R^2	SSE	Model Coefficients	Thickness/ Temperature (°C)	Model Name
257.9463364	0.003876	0.9998	0.9998	0.001187	$a=0.7769, b=0.2119, k=0.0009723, g=0.01159$	7/55	HCL 1
9.981318681	0.091	0.906	0.9083	0.6708	$a=0.5, b=-0.02498, k=-0.2851, n=0.3951$	7/55	Midilli-Kucuk 2
63.51592357	0.0157	0.9972	0.9972	0.02047	$k=0.0103$	7/55	Newton 3
71.57819225	0.01394	0.9978	0.9978	0.01573	$a=-0.7764, a=0.8577, k=0.01348$	7/55	Approximation of diffusion 4
64.67574578	0.01542	0.9973	0.9973	0.01949	$a=1.009, k=0.01042$	7/55	Henderson and pabis 5

بنابراین در میان تمامی تیمارهای مورد بررسی تیمار ۷/۵۵ مدل
 هایلا و کلاک دارای بالاترین ضریب نسبت R^2/RMSE در حد ۲۳۲/۱۳۳۷ می باشد.

بنابراین در میان تمامی تیمارهای مورد بررسی تیمار ۷/۵۵ مدل
 هایلا و کلاک دارای بالاترین ضریب نسبت R^2/RMSE در حد
 ۲۵۷/۹۴۶۳۳ فرآیند خشک شدن با جابجایی هوای داغ و تیمار

Table 5 Results of refractance window method at 95 (°C) and 7 (mm) thickness

R^2/RMSE	RMSE	R_{adj}	R^2	SSE	Coefficients Model	Thickness/ Temperature (°C)	Model Name
232.1337358	0.004307	0.9998	0.9998	0.001781	$a=1.028, b=0.02848, k=0.01659, g=0.01659, n=1.052$	7/95	HCL
155.9769039	0.006408	0.9995	0.9995	0.004024	$a=1, b=4.619 \times 10^{-0.5}, k=0.02048, n=1.04$	7/95	Midilli-Kucuk
70.98932384	0.01405	0.9974	0.9974	0.01975	$k=0.01995$	7/95	Newton
113.0828428	0.008836	0.9991	0.9992	0.005933	$a=1.006, b=0.9781, k=0.1995$	7/95	Approximation of diffusion
121.7145664	0.008142	0.9991	0.9991	0.006563	$a=1.045, k=0.02084$	7/95	Henderson and pabis

۳-۳- بررسی ضرایب نفوذ موثر روش جابجایی

هوای داغ

برای تعیین میزان ضرایب نفوذ موثر خشک شدن لایه نازک کدو حلوایی با روش جابجایی با هوای داغ، لگاریتم نسبت رطوبت بر مبنای زمان فرآیند در شکل ۳ ترسیم شد. در شکل ۴ ضریب نفوذ موثر رطوبت لایه های نازک کدو حلوایی خشک شده ارائه شده است. نتایج نشان داد که با افزایش دمای خشک کردن، ضریب نفوذ موثر رطوبت افزایش می یابد، که این امر توسط حرکت یا انتقال جرم از منافذ موئینه ماده غذایی توصیف می گردد. همانطور که از جدول ۲ مشاهده می گردد، در دمای ۷۵ (درجه سانتی گراد) و ضخامت ۷ (میلی متر) بالاترین مقدار ضریب نفوذ موثر رطوبت بدست آمد. مقادیر ضریب نفوذ موثر رطوبت به

طور مشابه توسط سایر محققین برای سایر محصولات کشاورزی گزارش شده است. برای برگ های نعنای ضرایب نفوذ موثر رطوبت در دماهای ۶۰ و ۷۰ (درجه سانتی گراد)، به ترتیب $0.9648 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ و $1.19 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ بدست آمد. برای کیوی با ضخامت ۱۰ (میلی متر) توسط خشک کردن با هوای داغ (دماهای ۴۰، ۵۰، ۶۰ و ۷۰ (درجه سانتی گراد)) ضرایب نفوذ رطوبت در دامنه 3.79×10^{-12} تا $7.53 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ تعیین گردید. برای گیلاس، ضریب نفوذ رطوبت موثر به ترتیب برای نمونه های مورد آزمایش (اتیل اولئات) و شاهد در دامنه $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ و $5.683 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ گزارش گردید. برای برش های میوه به (در دماهای ۳۵، ۴۵ و ۵۵ (درجه سانتی گراد))، بین $0.765 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ و $6.92 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ بود [۲۸، ۳۰].

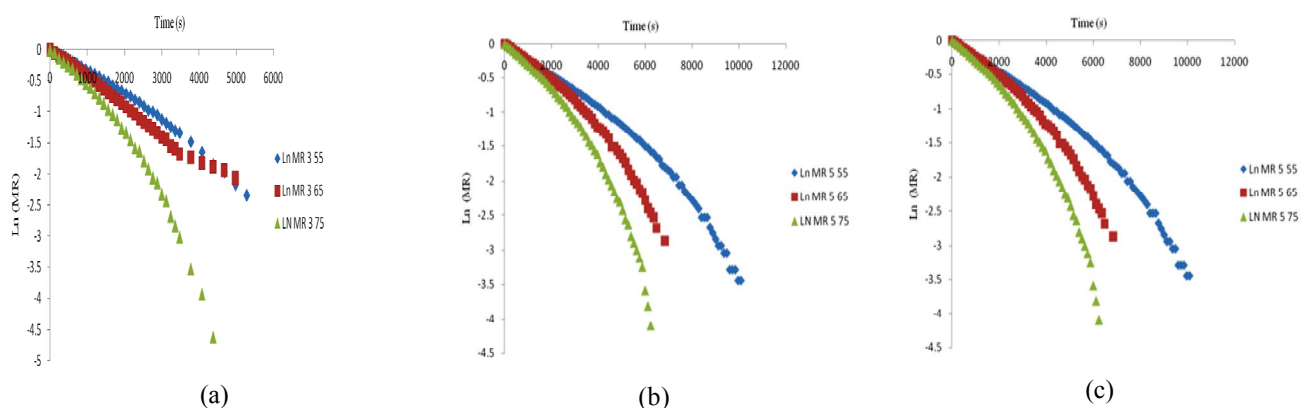


Fig 3 logarithmic changes of moisture ratio on time by convective hot air drying method in determination of effective diffusion coefficients for thicknesses of 3,5 and 7 mm

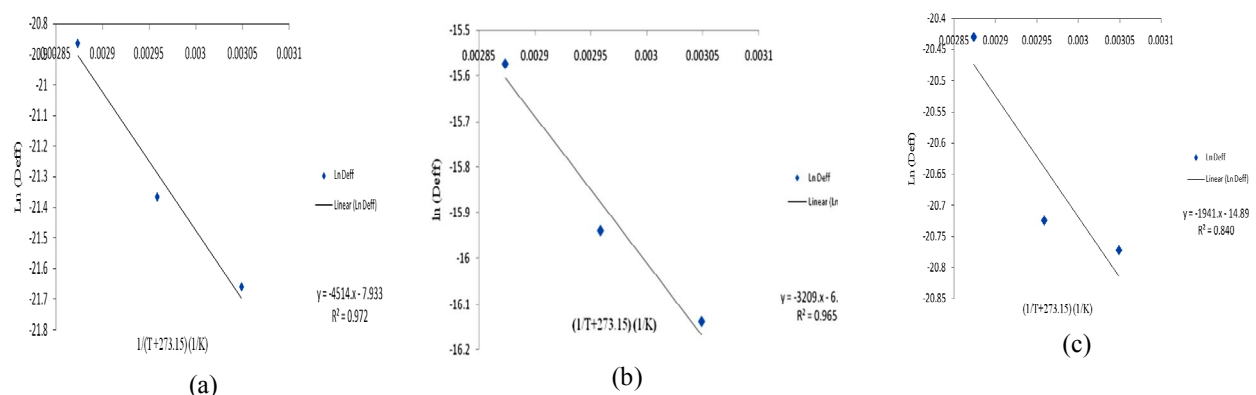


Fig 4 Relationship between effective diffusion coefficient and absolute temperature of the arrhenius equation for convective hot air drying for thicknesses of 3,5 and 7 mm

۳-۴- انرژی فعال سازی روش جابجایی هوای

داغ

مقدار انرژی فعال سازی در دامنه دمایی ۵۵ تا ۷۵ (درجه سانتی گراد) با ضخامت های ۳، ۵ و ۷ (میلی متر) برای لایه نازک کدو حلوائی به ترتیب در حد ۱۶/۱۴۰۷۹۹۶ (کیلوژول بر مول)، ۲۶/۶۸۶۲۷۷۲ (کیلوژول بر مول) و ۳۷/۵۳۱۰۵۸۸ (کیلوژول بر مول) محاسبه گردید. بنابراین با افزایش ضخامت لایه نازک کدو حلوائی طی فرآیند خشک شدن با روش هوای داغ، انرژی فعال سازی افزایش می یابد. مقدار انرژی فعال سازی تعیین شده توسط محققین برای محصولات کشاورزی گزارش شده است، به طوری که برای کیوی، ۳۸/۶ (کیلوژول بر مول)، گیلاس (تحت تیمار امولسیون قلیایی اتیل اولئات) برای نمونه های شاهد و پیش تیمار شده به ترتیب در حد ۴۹/۱۷ (کیلوژول بر مول) و ۴۳/۰۵، میوه به دماهای ۳۵، ۴۵ و ۵۵ (درجه سانتی گراد) در دامنه ۳۳/۸۳ تا ۴۱/۵۲ (کیلوژول بر مول) محاسبه گردید [۲۶، ۲۷].

۳-۵- خشک شدن با روش تابشی انکساری

۳-۵-۱- تاثیر دما بر زمان خشک شدن کدو حلوائی با

روش تابشی انکساری

میزان رطوبت پس از کاهش محتوای رطوبت کدو حلوائی، پس از توزین نمونه ها در فواصل زمانی مشخص ثبت گردید. در طی فرآیند خشک شدن کدو حلوائی رطوبت اولیه از ۸۹/۷۸٪ تا رطوبت نهایی ۹٪ بر مبنای مرطوب در دماهای ۷۵، ۸۵ و ۹۵ (سانتی گراد) با ضخامت های ۳، ۵ و ۷ (میلی متر) در شکل ۵ مشاهده می شود. نتایج نشان داد که دمای خشک کردن اثر قابل ملاحظه ای بر زمان خشک کردن دارد، همچنین زمان لازم جهت خشک شدن کدو حلوائی در ضخامت های ۳، ۵ و ۷ (میلی متر) در دماهای ۷۵، ۸۵ و ۹۵ (درجه سانتی گراد) به ترتیب کاهش می یابد. نتایج مشابه توسط سایر پژوهشگران روی محصولات کشاورزی مختلف مشاهده گردید [۲۴، ۲۶]. به لحاظ اینکه در روش تابشی انکساری، انرژی مادون قرمز در محل تماس فرآورده غذایی با فیلم مایلار، ایجاد می شود، در این مرحله انتقال حرارت به صورت همزمان با سه روش هدایت، جابجایی و تابش ایجاد شده و باعث تبخیر آب از فرآورده و انتقال سریع حرارت می گردد. علاوه بر این به دلیل ضخامت پایین صفحه مایلار، دمای فرآورده به سرعت به دمای آب به عنوان محیط حرارتی می رسد [۲۹].

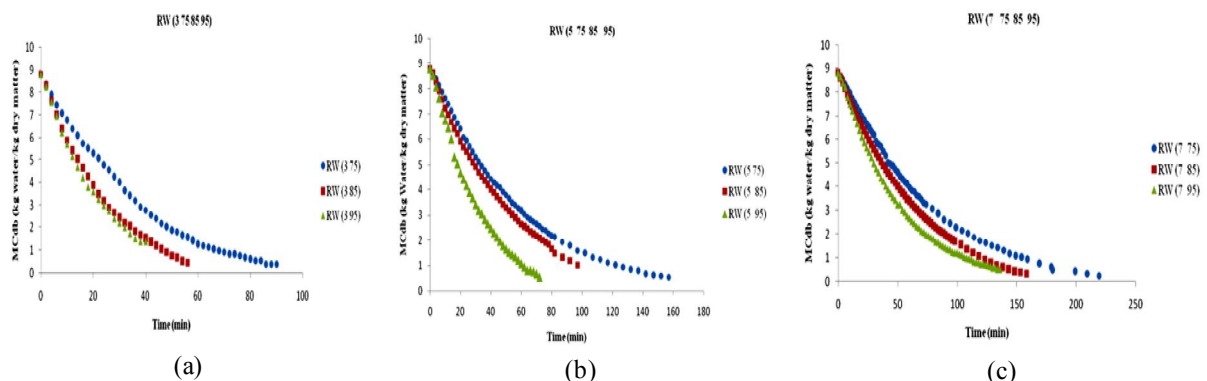


Fig 5 Effect of different temperatures on the drying kinetics of cast tape drying (CTD) of pumpkin samples with 3, 5 and 7 mm thicknesses

روش قفسه ای گزارش شده است [۳۰]. با توجه به منحنی خشک شدن (شکل ۲) نمونه های خشک شده به روش هوای داغ دو بخش سرعت ثابت و سرعت نزولی مشاهده می گردد. اما در

کاهش زمان خشک شدن در روش تابشی انکساری توسط اکوآ مارتینز و همکاران (۲۰۱۲) برای برش های نازک انبه خشک شده با روش تابشی انکساری نسبت به نمونه های خشک شده با

محلول با غلظت بالا در برابر خروج رطوبت مقاومت می نمایند [۳۱]. همچنین مشخص شد که فرآیند خشک شدن برش های نازک کدو حلوایی با روش تابشی انکساری به صورت سرعت نزولی بوده و فاقد مرحله خشک شدن با آهنگ ثابت می باشد [۲۹]. نتایج مشابه توسط ابونی و همکاران (۲۰۰۲) گزارش شده است [۱۳].

نمونه های خشک شده به روش تابشی انکساری، دوره خشک شدن ثابت قابل مشاهده نبوده و تنها دوره نزولی مشاهده می گردد (شکل ۵). آهنگ خشک شدن در زمان های اولیه فرآیند سریعتر بوده، در حالی که در پایان فرآیند خشک شدن، روند آهسته تر شده و برخی عوامل مانند چروکیدگی و تشکیل لایه سخت در سطح ماده غذایی، در اثر وجود مواد قندی و سایر مواد

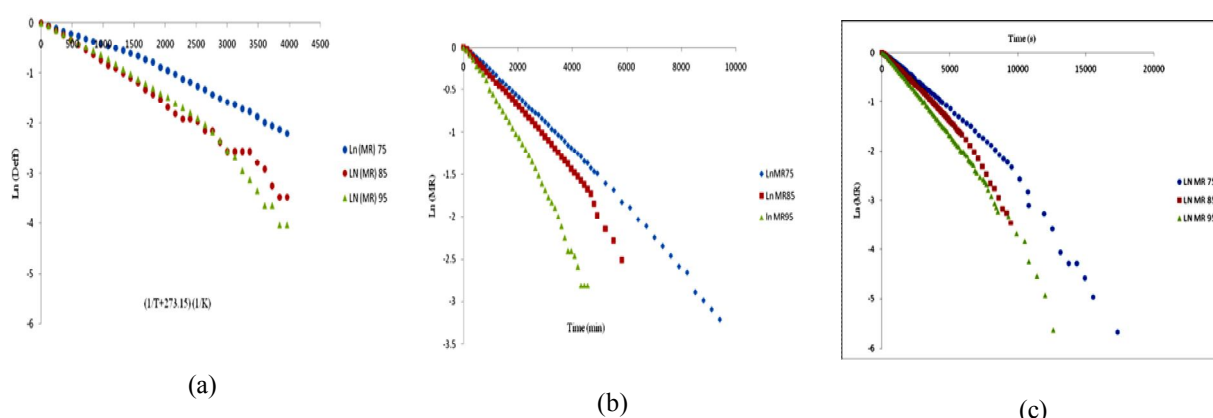


Fig 6 Logarithmic changes of the moisture ratio on drying time by cast tape drying (CTD) process to determine the effective diffusion coefficients for a thickness of 3,5 and 7 (mm)

گزارش شده است. برای انبه ضرایب نفوذ موثر رطوبت در دمای ۹۲ (درجه سانتی گراد) و ضخامت های ۱ و ۲ میلی متر، در دامنه $1/56 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $4/40 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ بدست آمد [۳۰]. برای پوره انبه ضرایب نفوذ موثر رطوبت در دماهای ۷۶ و ۸۰ (درجه سانتی گراد)، به ترتیب $8/27 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ و $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ بدست آمد [۳۱]. برای پوره موز با ضخامت های ۲ و ۳ (میلی متر) با روش تابشی انکساری (دماهای ۷۰ تا ۹۰ (درجه سانتی گراد)) ضرایب نفوذ رطوبت در دامنه $2/89 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $8/84 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ تعیین گردید [۳۲]. برای سیب، ضریب نفوذ رطوبت موثر در دامنه $8/16 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ تا $1/5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ گزارش گردید [۳۳]. برای برش ها و پوره میوه فیسالیس $1 \text{ m}^2/\text{s}$ تا $10/1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ بدست آمد [۳۴].

۳-۵-۲- بررسی ضرایب نفوذ موثر روش تابشی

انکساری

برای تعیین میزان ضرایب نفوذ موثر خشک شدن لایه نازک کدو حلوایی با روش تابشی انکساری، لگاریتم نسبت رطوبت بر مبنای زمان فرآیند در شکل ۶ ترسیم شد. در جدول ۶ ضریب نفوذ موثر رطوبت لایه های نازک کدو حلوایی خشک شده ارائه شده است. نتایج نشان داد که با افزایش دمای خشک کردن، ضریب نفوذ موثر رطوبت افزایش می یابد، که این امر توسط حرکت یا انتقال جرم از منافذ موئینه ماده غذایی توصیف می گردد. همانطور که از جدول ۶ مشاهده می گردد، در دمای ۷۵ (درجه سانتی گراد) و ضخامت ۷ (میلی متر) بالاترین مقدار ضریب نفوذ موثر رطوبت بدست آمد. مقادیر ضریب نفوذ موثر رطوبت به طور مشابه توسط سایر محققین برای سایر محصولات کشاورزی

Table 6 the effective diffusion coefficients (D_{eff} (m^2/s)) obtained by cast tape drying (CTD)

effective diffusion coefficients(D_{eff} (m^2/s))			
95 (°C)	85	75	Temperature (°C) Thickness (mm)
8.673910^{-10}	5.2588710^{-10}	3.92387×10^{-10}	3
1.72392×10^{-7}	1.19591×10^{-7}	9.80571×10^{-8}	5
2.39684×10^{-14}	2.07052×10^{-14}	1.85257×10^{-14}	7

۳-۵-۳- انرژی فعال سازی روش تابشی انکساری

مقدار انرژی فعال سازی در دامنه دمایی ۵۵ تا ۷۵ (درجه سانتی گراد) با ضخامت های ۳، ۵ و ۷ (میلی متر) برای لایه نازک کدو حلوائی به ترتیب در حد ۳۳/۵۰۴۵۸۸۶ (کیلوژول بر مول)، ۲۰/۳۲۶۵۷ (کیلوژول بر مول) و ۱۳/۶۹۱۵ (کیلوژول بر مول) محاسبه گردید. بنابراین با افزایش ضخامت لایه نازک کدو حلوائی طی فرآیند خشک شدن با روش تابشی انکساری، انرژی

فعال سازی افزایش می یابد. مقدار انرژی فعال سازی تعیین شده به روش تابشی انکساری توسط محققین برای محصولات کشاورزی گزارش شده است، به طوری که برای عصاره آلوورا، ۲۴/۷۰۴ (کیلوژول بر مول) [۳۵]، خیار در حد ۱۳/۵۵ (کیلوژول بر مول) [۳۶] و میوه فیسالیس در دماهای ۶۰، ۷۵ و ۹۵ (درجه سانتی گراد) در دامنه ۳۱/۱، ۳۳/۴ و ۴۱/۳ (کیلوژول بر مول) محاسبه گردید [۳۴].

Table 7 Activation energy values of the cast tape drying (CTD)

Activation Energy (kJ/mol)	Thickness (mm)
33.5045886	3
20.32657	5
13.6915	7

۴- نتیجه گیری

در این بررسی، تاثیر دما بر ویژگی های خشک شدن لایه نازک کدو حلوائی به روش جابجایی با هوای داغ و تابشی انکساری مطالعه گردید. افزایش دمای خشک شدن سبب کاهش زمان و بالا رفتن سرعت خشک شدن و افزایش ضریب نفوذ موثر رطوبت موثر در هر دو روش گردید. به طور کلی سرعت خشک شدن نمونه ها در تیمارهای مورد بررسی با روش تابشی انکساری بیشتر از روش جابجایی با هوای داغ بود. به لحاظ اینکه در روش تابشی انکساری، در محل تماس فرآورده غذایی دارای رطوبت بالا با لایه مایلار، انرژی مادون قرمز ایجاد می گردد. در این مرحله انتقال حرارت با هر سه روش هدایت، جابجایی و تابش به شکل همزمان اتفاق می افتد که منجر به انتقال سریع حرارت و خروج آب از فرآورده غذایی می شود. همچنین به دلیل ضخامت پایین فیلم مایلار، به سرعت دمای فرآورده به دمای آب به عنوان محیط حرارتی می رسد [۱۳ و ۳۷].

بنابراین سرعت خشک شدن کدو حلوائی با استفاده از روش تابشی انکساری در مقایسه با روش جابجایی هوای داغ بالاتر می

باشد. در بررسی انجام شده توسط اکوا-مارتینز و همکاران (۲۰۱۲) بر روی برش های انبه خشک شده به روش تابشی انکساری نسبت به روش قفسه ای کاهش زمان خشک شدن مشاهده شد. با بررسی منحنی خشک شدن به روش جابجایی هوای داغ، دو بخش سرعت ثابت و سرعت نزولی قابل مشاهده است. از آنجا که دما در روش خشک شدن به روش تابشی انکساری بالاتر از روش جابجایی با هوای داغ می باشد، لذا رسیدن دمای سطح ماده غذایی به دمای خشک کن، سریعتر بوده و فرآیند خشک شدن به شکل سریعتر شروع شده و موجب بالا رفتن سرعت خشک کردن به روش تابشی انکساری نسبت به روش جابجایی با هوای داغ می گردد. در نمونه های خشک شده به روش تابشی انکساری، دوره خشک کردن ثابت مشاهده نشد. در این نمونه ها تنها دوره نزولی وجود داشت. همان طور که از شکل نیز مشخص است، آهنگ خشک کردن در لحظات اولیه فرآیند سریعتر می باشد، در حالی که در انتهای فرآیند خشک شدن، کندتر شده است. بعضی از عوامل در برابر خروج رطوبت مقاومت نشان می دهند [۳۰].

- [2] Yadav, M., S. Jain, R. Tomar, G.B.K.S. Prasad, and H. Yadav. 2010. Medicinal and biological potential of pumpkin: An updated review. *Nutr. Res. Rev.* 23(2): 184–190.
- [3] Cruz, R.C.B., C.D. Meurer, E.J. Silva, C. Schaefer, A.R.S. Santos, A. Bella Cruz, and V. C.Filho. 2006. Toxicity evaluation of *Cucurbitamaxima*. Seed extract in Mice. *Pharm. Biol.* 44(4): 301–303.
- [4] Barakat, L.A., and R.R. Mahmoud. 2011. The antiatherogenic, renal protective and immunomodulatory effects of purslane, pumpkin and flax seeds on hypercholesterolemic rats. *North Am. J. Med. Sci* 3(9): 411–417.
- [5] Patel, S. 2013. Pumpkin (*Cucurbita* sp.) seeds as nutraceutic: A review on status quo and scopes. *Med. J. Nutr. Metab.* 6(3):183–189.
- [6] Mythili, P. and T. Kavitha. 2017. Overview on *Cucurbita maxima* seed. *J. Dent. Med. Sci.* 16 (3):29–33.
- [7] Unachukwu, M.N., C. Nwakanma, and J. Ekuma. 2018. Evaluation of antimicrobial activities of fluted pumpkin leaf extract (*Telfairia occidentalis*) against selected pathogenic bacteria using standard drug. *Int. J. Curr. Microbiol. Appl. Sci.* 3(11): 521–527.
- [8] Dhiman, A., N. Vidiya, A. Surekha, and R. Preethi. 2017. Studies on development and storage stability of dehydrated pumpkin based instant soup mix. *J. Appl. Nat. Sci.* 9(3):1815–1820.
- [9] Sharma, P., Kaur, G., Kehinde, B. A., Chhikara, N., Panghal, A. & Kaur G. 2020. Pharmacological and biomedical uses of extracts of pumpkin and its relatives and applications in the food industry: a review, *International Journal of Vegetable Science.* 26 (1): 79-95.
- [10] FAO. 2019. Statistical Database. Available at: www.fao.org/faostat/en/#data/QC.
- [11] Barrozo, M.A.S., Souza, A.M., Costa, S.M., Murata, V.V. 2001. Simultaneous heat and mass transfer between air and soybean seeds in a concurrent moving bed. *International Journal of Food Science and Technology* 36 (4): 393–399.
- [12] Figiel, A. 2010. Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of

نتایج مدل سازی لایه نازک نشان داد که در بین مدل های مورد بررسی، مدل هایلا و کلاک، به دلیل دارا بودن R^2 بالا و RMSE پایین به عنوان بهترین مدل داده های آزمایشی را برازش نموده و همچنین این مدل برای خشک شدن لایه نازک کدو حلوایی پیشنهاد می شود که می توان از آن در توصیف پدیده انتقال رطوبت کدو استفاده نمود. ضرایب نفوذ موثر خشک شدن لایه نازک کدو به روش جابجایی با هوای داغ ضخامت ۷ (میلی متر)، در حد $1/85257 \times 10^{-14}$ (متر مربع بر ثانیه)، در دمای ۸۵ (درجه سانتی گراد) و ضخامت ۷ (میلی متر)، در حد $2/07052 \times 10^{-14}$ (متر مربع بر ثانیه) و در دمای ۹۵ (درجه سانتی گراد) و ضخامت ۷ (میلی متر)، در حد $2/39684 \times 10^{-14}$ (متر مربع بر ثانیه) محاسبه گردید. ضرایب نفوذ موثر خشک شدن لایه نازک کدو به روش تابشی انکساری ضخامت ۷ (میلی متر)، در دمای ۷۵ (درجه سانتی گراد) در حد $1/85252 \times 10^{-14}$ (متر مربع بر ثانیه)، در دمای ۸۵ (درجه سانتی گراد) و ضخامت ۷ (میلی متر)، در حد $2/07052 \times 10^{-14}$ (متر مربع بر ثانیه) و در دمای ۹۵ (درجه سانتی گراد) و ضخامت ۷ (میلی متر)، در حد $2/39684 \times 10^{-14}$ (متر مربع بر ثانیه) محاسبه گردید. مقدار انرژی فعال سازی $37/5310588$ (کیلوژول بر کیلوگرم) برای هوای داغ و $20/32657$ (کیلوژول بر کیلوگرم) برای روش تابشی انکساری تعیین گردید. در میان تمامی تیمارهای مورد بررسی تیمار ۷/۵۵ مدل هایلا و کلاک دارای بالاترین ضریب نسبت R^2 /RMSE در حد $257/94633$ فرآیند خشک شدن با جابجایی هوای داغ و تیمار ۷/۹۵ مدل هایلا و کلاک دارای بالاترین ضریب نسبت R^2 /RMSE در حد $232/1337$ بدست آمد. بنابراین با استفاده از برازش داده ها می توان عملیات خشک شدن کدو حلوایی را در سطح صنعتی مدل سازی و پیاده نمود.

۵- منابع

- [1] Gliemmo, M.F., Latorre, M.E., Gerschenson, L.N. and Campos, C.A. 2009. Color stability of pumpkin (*Cucurbita moschata*, Duchesne ex Poiret) puree during storage at room temperature: Effect of pH, potassium sorbate, ascorbic acid and packaging material. *LWT-Food Science and Technology*, 42 (1): 196-201.

- some vegetables and fruits. *Journal of Food Engineering* 73, 75–84.
- [22] Dermesonlouoglou, E.K., Giannakourou, M.C. & Taoukis, P.S. 2007. Kinetic modeling of the degradation of quality of osmo-dehydrofrozen tomatoes during storage. *Food Chemistry* 103: 985–993.
- [23] Al-Harabsheh, M, Al-Muhtaseb, A.H. and Magee, T.R.A. 2009. Microwave drying kinetics of tomato pomace: Effect of osmotic dehydration. *Chemical Engineering and Processing*, 48: 524–531.
- [24] Evin, D. 2012. Thin layer drying kinetics of *Gundelia tournefortii* L. *Food and Bioprocess processing*, 9 0: 323–332.
- [25] Kashaninejad, M., Mortazavi, A., Safekordi, A., Tabil, L.G. 2007. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts, *Journal of Food Engineering*. 78:1: 98-108.
- [26] Chong, C.H., Lim Law, C., Cloke, M., Lik Hii, C., Chuah Abdullah, L., Wan Daud, W.R. 2008. Drying kinetics and product quality of dried *Chempedak*. *Journal of Food Engineering*. 88: 522–527.
- [27] Doymaz, I., and Ismail, O. 2011. Drying characteristics of sweet cherry. *food and bioprocess processing*. 8 9: 31–38.
- [28] Therdthai, N., & Zhou, W. 2009. Characterization of microwave vacuum drying and hot air drying of mint leaves (*Mentha cordifolia* Opiz ex Fresen). *Journal of Food Engineering*. 91: 482–489.
- [29] Nindo, C. I. and Tang, J. 2007. Refractance window dehydration technology: a novel contact drying method. *Drying Technology*. 25: 37–48.
- [30] Ochoa-Martínez, C. I., Quintero, P. T., Ayala, A. A., & Ortiz, M. J. 2012. Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window™ technique. *Journal of Food Engineering*. 109(1): 69-75.
- [31] Amer, B. M. A. 2011. Thin layer drying kinetics of mango puree in refractance window drying system. *Misr J. Ag. Eng.*, 28(4): 1021 – 1039.
- [32] Rajoriya, D., Bhavya, M.L, Hebbar, H.U. 2021. Impact of process parameters on drying behaviour, mass transfer and quality profile of refractance window dried banana puree, *LWT*. 145:111330.
- convective and vacuum-microwave methods. *Journal of Food Engineering*. 98: 461–470.
- [13] Nindo, C. I., and J. Tang. 2007. Refractance window dehydration technology: A novel contact drying method. *Drying Technology*, 25(1): 37–48.
- [14] Jafari, S.M., Azizi, D., Mirzaei, H. and Dehnad, D. 2016. Comparing quality characteristics of oven dried and Refractance Window dried kiwifruits. *Journal of Food Processing and Preservation*, 40(3): 362-372.
- [15] Caparino, O. A., Sablani, S. S., Tang, J., Syamaladevi, R. M. & Nindo, C. I. 2013. Water Sorption, Glass Transition, and Microstructures of Refractance Window- and Freeze-Dried Mango (Philippine “Carabao” Var.) Powder, *Drying Technology*. 31:16, 1969-1978.
- [16] Ortiz-Jerez, M.J. & Ochoa-Martínez, C.I. 2015. Heat Transfer Mechanisms in Conductive Hydro-Drying of Pumpkin (*Cucurbita maxima*) Pieces, *Drying Technology*, 33 (8): 965 972.
- [17] Hernández-Santos, Betsabé., Martínez-Sánchez, Cecilia E., TorrucoUco, Juan G., Rodríguez-Miranda, Jesús, Ruiz-López, Irving I., Vajando-Anaya, Edgar S., CarmonaGarcía, Roselis, & Herman-Lara, Erasmo. 2015. Evaluation of physical and chemical properties of carrots dried by Refractance Window drying, *Drying Technology*, 34 (12): 1414-1422.
- [18] Babetto, A.C., Freire., F.B., Barrozo, M.A.S. and Freire, J.T. 2011. Drying of garlic slices: Kinetics and nonlinearity measures for selecting the best equilibrium moisture content equation. *Journal of Food Engineering* 107:347–352.
- [19] Krokida, M.K., V.T. Karathanos, Z.B. Maroulis and D. Marinos-Kouris. 2003. Drying kinetics of some vegetables. *Journal of Food Engineering*. 59: 391-403.
- [20] Chen, D., Zheng, Y. and Xifeng Zhu. 2012. Determination of effective moisture diffusivity and drying kinetics for poplar sawdust by thermogravimetric analysis under isothermal condition. *Bioresource Technology* 107:451–455.
- [21] Akpınar, E.K. 2006. Determination of suitable thin layer drying curve model for

ASABE. 53(4):1193-1200.

- [36] Akinola, A.A., Talabi, O.G. and Ezeorah, S. N. 2018. Effective Moisture Diffusivity and Activation Energy Estimation of Cucumber Fruit Slices Using a Refractance Window Dryer. The Journal of the Association of Professional Engineers of Trinidad and Tobago. 46(2): 11-16.
- [37] Shrivastav, S., Ganorkar, P.M., Prajapati, K. M. and Patel, D. B. 2021. Drying kinetics, heat quantities, and physiochemical characteristics of strawberry puree by Refractance Window drying system. J Food Process Eng. 13776.
- [33] Rajoriya, D., Shewale, S. R., Bhavya, M. L., & Hebbar, H. U. 2020. Far infrared assisted refractance window drying of apple slices: Comparative study on flavour, nutrient retention and drying characteristics. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 66: 102530.
- [34] Puente-Díaz, L., Spolmann, O., Nocetti, D., Zura-Bravo, L., & Lemus-Mondaca, R. 2020. Effects of Infrared-Assisted Refractance Window™ Drying on the drying kinetics, microstructure, and color of physalis fruit purée. Foods, 9(3):1-18.
- [35] Nindo, C. I, Powers, J. R. and Tang, J. 2011. Transactions of the



Study of Drying Behavior of Pumpkin by Convective Hot Air Drying– Cast Tape Drying

Askari, B.¹, Kashaninejad, M.^{1*}, Ziaifar, A. M.¹, Esmaelzade, E.²

1. Faculty of Food Science, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.
2. Department of Biosystem Engineering, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran.

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Article History:</p> <p>Received 2019/08/27 Accepted 2021/08/26</p> <p>Keywords:</p> <p>Convective hot air, Kinetic modeling, Pumpkin, Cast tape drying, Thin layer drying.</p> <p>DOI: 10.52547/fsct.18.09.25</p> <p>*Corresponding Author E-Mail: kashani@gau.ac.ir</p>	<p>In this study, the drying process of pumpkin thin layers was investigated by cast tape drying (CTD) and convective hot air drying (CHD) methods and the effect of temperature and drying kinetics of the pumpkin was determined along with the best mathematical model to fit the changes on moisture content to time ratio. At first, Pumpkin slices were prepared with 3, 5 and 7 mm thicknesses. Drying was performed at 75, 85 and 95 (°C) by CTD method and at 55, 65 and 75(°C) by CHT method in triplicate. Based on the kinetic model evaluated by Hii, Law and Cloke, the 7 mm thickness was selected as an optimum thickness in both drying methods. The optimal drying temperature ranges were 55 and 95 (°C) by CHD method and CTD method, respectively. Five mathematical kinetic models were fitted on the experimental data using four criteria including, Determination of Coefficient (R^2), Root Mean Square Error (RMSE), Sum of Squares (SSE) and Chi-square (χ^2). Also, effective diffusion coefficient (D) and activation energy (Ea) were calculated. The results showed that Hii, Law and Cloke's model predicted the drying behavior during CTD. Activation energy of 37.5310588kJ/mol and 20.32657 kJ/mol was calculated for CHD and CTD methods respectively. The best mathematical model for drying a thin layer of pumpkin by CTD and CHD method was proposed Hii, Law and Cloke's model.</p>